食蚜蝇悬停飞行时的气动特性

牟晓蕾 孙 茂

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 用数值求解 N-S(Navier-Stokes)方程的方法得到了食蚜蝇在拍动平面倾斜悬停飞行时的气动力和气动力矩,利用得到的气动力矩和已知的翅膀的惯性矩求得食蚜蝇悬停时的能耗,并将得到的气动力和能耗与正常悬停时的进行比较. 主要结果为:维持食蚜蝇体重所需的举力主要由下拍产生,该举力是由翅膀的升力和阻力共同贡献的,这两点均与水平拍动的情形不同;飞行的比功率为 31.71 W · kg^{-1},与正常悬停时接近,这表明此种悬停方式有便于进行机动飞行的优点,但不带来额外的能耗.

关 键 词: 食蚜蝇; 悬停; 倾斜拍动平面; 气动力; 功率

中图分类号: V 211.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)07-0925-06

Aerodynamics of hovering true hoverflies

Mou Xiaolei Sun Mao

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The aerodynamic force production of true hoverfly which can hover with an inclined stroke plane (body being approximately horizontal) was investigated, using the method of numerically solving the Navier-Stokes equation. The power requirement was computed using the aerodynamic moment and the inertia of the wing. The aerodynamic force production and power requirement were compared with that of the normal hovering whose stroke plane was horizontal. The main results are as following. The major part of the weight-supporting vertical force is produced in the downstroke and it is contributed by both the lift and the drag of the wing, unlike the normal-hovering case in which the lift principle is mainly used to produce the weight supporting force. The mass specific power is 31.71 W · kg^{-1} that is similar to the normal hovering case. Because of the body being horizontal, immediate forward acceleration and roll maneuvering can be made, but no more power is needed.

Key words: true hoverfly; hovering; inclined stroke plane; aerodynamic force; power

许多昆虫都会采用悬停这种方式飞行. 它们中的大多数在悬停飞行时,拍动平面接近水平,身体与水平面有较大倾角,这种悬停方式被称为正常悬停[1]. 但有一些具有高超悬停飞行能力的昆虫(例如食蚜蝇和蜻蜓)在悬停飞行时,翅膀的拍动平面与水平面有较大的倾角[2-3],身体保持水平状态,而且翅膀的拍动幅度较小.

近年来人们从空气动力学,能耗,飞行的动稳定性与控制等方面对昆虫的飞行进行了研究,并取得了一定的进展[4-11]. 但是这些研究大部分都是针对昆虫的正常悬停,拍动平面倾斜的情形研究得很少. 目前已有的研究也仅限于运动学和形态学参数的测量,如文献[3]测量了蜻蜓悬停时的运动学参数,文献[2]对食蚜蝇的悬停飞行进行了测量,还没有空气动力学特性及能耗方面的研究. 本文基于文献[2,12]有关翅膀拍动运动的

收稿日期: 2011-05-30; **网络出版时间**: 2012-06-29 20:20

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120629.2020.006.html

基金项目: 国家自然基金资助项目(10732030)

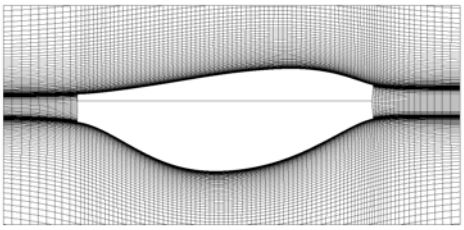
作者简介: 牟晓蕾(1984 -),男,山东烟台人,博士生,mouxiaolei@ase.buaa.edu.cn.

实验数据,用数值模拟的方法,研究食蚜蝇以倾斜拍动平面方式悬停时气动力的产生机制及能耗等问题.

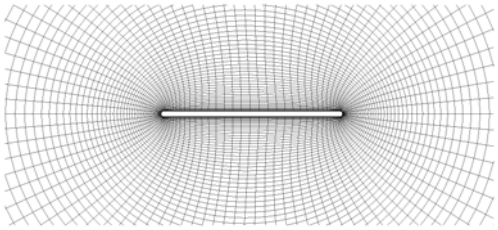
1 方 法

1.1 翅膀模型及运动

根据文献[12]给出的食蚜蝇的翅膀图片,用一平板翼来模拟真实翅膀,其平面形状如图 1a 所示;其剖面为平板,该平板的厚度为当地弦长的 3%,前后缘为圆弧,如图 1b 所示.



a 平面形状



b 剖面形状

图 1 食蚜蝇模型翅的平面和剖面形状及网格

根据实验观测的结果,本文将模型翅的运动近似为只有两个自由度,一个是绕垂直于拍动平面 OZ 轴的转动($OXYZ$ 固定在拍动平面上,拍动平面和水平面的夹角为 β),其转角记为 φ,也即是翅的拍动角;另一个是绕翅膀展向轴 oy 的转动($oxyz$ 固定在昆虫翅膀上随翅膀一起运动),其转角记为 α,也即是翅的运动攻角,如图 2 所示. 翅膀绕 OZ 轴的转动角速度 $\dot{\phi}$ 定义为

$$\dot{\phi} = \pi n \Phi \sin(2\pi n t)$$

其中,n 为拍动频率;Φ 为拍动幅度. 攻角在上下拍平动阶段保持定值,下拍攻角用 α_d 表示,上拍攻角用 α_u 表示. 对于 α 随时间变化的规律,以翅膀在第 m 个拍动周期内向上翻转为例描述如下:

$$\alpha = \alpha_d + a\{(t - t_1) - \frac{\Delta t_r}{2\pi}\sin[2\pi(t - t_1)/\Delta t_r]\}$$

$$t_1 \leqslant t \leqslant t_1 + \Delta t_r$$

其中,a 为常数,$a = (180° - \alpha_u - \alpha_d)/\Delta t_r$;$\Delta t_r$ 为翻转时间;t_1 为翅膀开始翻转的时刻,$t_1 = mT - 0.5T - \Delta t_r/2 - \Delta t$,$\Delta t$ 为翅膀在向上翻转过程中超前翻转的时间,下翻时与以上定义类似.

将上述方程用参考速度 U、参考长度 c 和参考时间 c/U(U 为翅膀面积的二阶矩折合半径 r_2 处的平均线速度,定义为 $U = 2\Phi n r_2$;c 为平均弦长)无量纲化后,可知,只需给出 Φ,α_d,α_u,Δt_r^*(Δt_r^* 为无量纲化后的翻转时间,$\Delta t_r^* = \Delta t_r U/c$)和 Δt^*(Δt^* 为无量纲化后的超前翻转时间,$\Delta t^* = \Delta t U/c$)即可确定模型翅的运动模式.

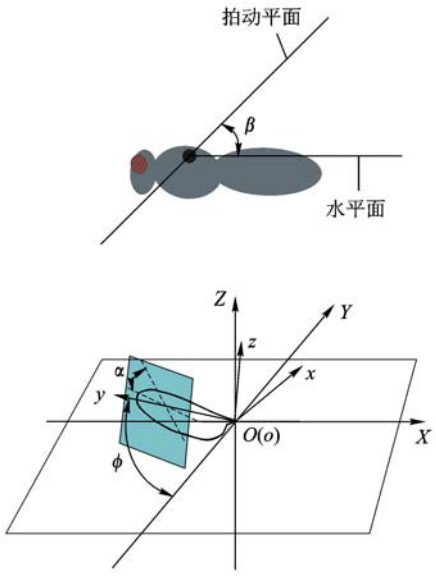


图 2 模型翅运动以及坐标系示意图

1.2 N-S 方程及计算方法

在惯性坐标系 $OXYZ$ 下,三维非定常不可压 N-S(Navier-Stokes)方程的无量纲形式为

$$\frac{\partial u}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial Y} + \frac{\partial w}{\partial Z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u\frac{\partial u}{\partial X} + v\frac{\partial u}{\partial Y} + w\frac{\partial u}{\partial Z} = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u\frac{\partial v}{\partial X} + v\frac{\partial v}{\partial Y} + w\frac{\partial v}{\partial Z} = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Z^2}\right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} + u\frac{\partial w}{\partial X} + v\frac{\partial w}{\partial Y} + w\frac{\partial w}{\partial Z} = -\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial Z^2}\right)$$

其中,u,v 和 w 为无量纲速度的 3 个分量;p 为无量纲压力;τ 为无量纲时间;雷诺数 $Re = cU/\nu$,ν 为运动粘性系数.

N-S 方程的数值解法与文献[13]的相同,采用文献[14-15]的拟压缩性方法求解. 该方法在连续方程中加入压力的拟时间偏导数项,这样物理上相当于把不可压缩流变成可压缩流. 动量方

程的时间导数项采用二阶的三点后差来离散,粘性项近似采用二阶中心差分离散,对流项采用基于矢通量分裂方法的迎风差分来离散,其中内部网格点采用三阶的迎风差分格式离散,边界点采用二阶迎风差分格式. 在求解时间离散的动量方程时,为保证速度散度为 0(即满足不可压条件)每个物理时间步用拟时间步进行内迭代,直到压力对虚拟时间的导数近似为 0,此时新时间步的速度散度就近似为 0,对在离散点上的代数方程组用线性 Gauss-Seidel 方法进行迭代求解. 关于计算方法的详细描述参见文献[16].

得到 N-S 方程的数值解后,离散的网格点上每个时刻的速度分量和压力都可以得到. 翅膀上的气动力(包括举力 V,水平力 H,升力 L 和阻力 D)可以通过翅面上的压力和粘性力得到. 举力系数 C_V,水平力系数 C_H,升力系数 C_L 和阻力系数 C_D 分别定义为 $C_V = V/0.5\rho U^2 S$, $C_H = H/0.5\rho U^2 S$, $C_L = L/0.5\rho U^2 S$, $C_D = D/0.5\rho U^2 S$,其中 ρ 为流体的密度,S 为翅膀的面积.

1.3　食蚜蝇的运动学参数及形态学参数

如前所述要确定模型翅的运动模式,需要给出其运动学参数及形态学参数. 文献[2]通过高速摄像技术对悬停时的食蚜蝇进行观测并得到了部分运动学参数. 拍动平面与水平面的夹角 $\beta = 42°$;拍动频率 $n = 144$ Hz;拍动幅度 $\Phi = 69°$;悬停飞行时身体轴线与水平面夹角 $\chi = 0°$. Δt_r^* 为拍动周期的 25%;翅膀在向上翻转过程中超前翻转的时间 Δt^* 为拍动周期的 6.25%(下翻过程仍为对称转动模式). 文献[12]给出了该食蚜蝇的形态学参数,总质量 $m = 28.1$ mg;翅膀长度 $R = 10.0$ mm;平均弦长 $c = 2.52$ mm;一个翅膀的面积 $S = 25.25$ mm^2;翅膀面积的二阶矩折合半径 $r_2 = 0.565R$. 基于以上的运动学参数和形态学参数,可以确定出参考速度 $U = 1.96$ m/s,$Re \approx 342$,拍动的无量纲周期 $\tau_c = U/nc = 5.40$.

至此,除 α_d 和 α_u 外,需要的运动学参数和形态学参数均已知. 本文将用悬停飞行时的力平衡条件(翅膀的平均举力平衡体重,平均水平力为 0),来确定 α_d 和 α_u.

2　结果与讨论

2.1　方法的验证和网格试验

本文所用的计算程序与文献[13]相同,该计算程序已经被多次验证. 文献[17]使用单体网格计算果蝇模型翅拍动时的气动力,并与相关实验结果进行比较,计算结果与实验值吻合得很好. 文献[18]通过计算与文献[19 – 20]的实验结果比较,进一步验证了程序的正确性. 文献[16]使用重叠网格方法计算了一对翼型的打开运动,其结果与相关实验的测量结果吻合得很好. 这些工作都表明,本文使用的数值计算方法是可靠的.

为了得到不依赖于网格密度的结果,本文对网格进行了测试. 选取了以下 3 组网格:24 × 25 × 35(分别为法向、周向和展向的网格点数;翅面法向第 1 层网格间距为 0.004c),48 × 47 × 70(翅面法向第 1 层网格间距为 0.002c),93 × 93 × 140(翅面法向第 1 层网格间距为 0.001c). 可以看出,每次加密网格时在各个方向上网格的密度都被近似加倍了. 在法向,远场边界距翅膀 20 倍平均弦长,展向远场边界距翅膀 6 倍平均弦长. 密网格(93 × 93 × 140)的平面和剖面形状如图 1 所示. 无量纲的时间步长为 0.02(当时间步长小于等于 0.02 时,时间步长对数值求解的精度几乎没有影响). 由以上 3 组网格的求解得到的结果对比如图 3 所示.

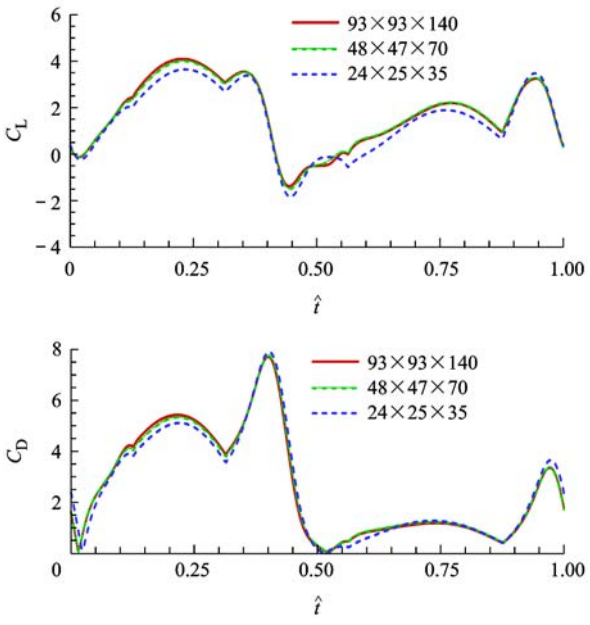


图 3　用不同密度的网格计算得到的一个拍动周期内的 C_L,C_D

为描述方便引入一个周期内的无量纲时间 $\hat{t}$,$\hat{t} = 0$ 表示下拍的开始时刻,$\hat{t} = 1$ 表示接下来的上拍结束时刻. 可以发现,第 1 次加密网格(从网格 24 × 25 × 35 加密到网格 48 × 47 × 70)后对计算结果产生了较大的影响,但是第 2 次加密网格(从网格 48 × 47 × 70 加密到网格 93 × 93 × 140)后对计算结果的影响却很小. 对于第 1 次加密网格,C_L 和 C_D 平均值的变化量分别为 0.19 和

0.28,而第2次加密网格,C_L 和 C_D 平均值的变化量分别为0.05和0.06,两次加密网格使得 C_L 和 C_D 平均值的变化量的比值分别为0.05/0.19和0.06/0.28,可见其比值都接近1/4,这与二阶精度方法误差分析的结果吻合. 按照前面给出的数据来估算网格 $93\times93\times140$ 的求解误差. 假设网格再加密一次,可以估计得到 C_L 和 C_D 平均值的变化量分别为0.012 5和0.015(0.05/4 = 0.012 5,0.06/4 = 0.015). 基于1/4的收敛速率,可以估算出用网格 $93\times93\times140$ 计算得到的 C_L 和 C_D 平均值的误差分别为0.017和0.02($0.0125\times(4/3)=0.017$, $0.015\times(4/3)=0.02$),而 C_L 和 C_D 的平均值分别为1.68和2.64. 因此可以得到基于网格 $93\times93\times140$ 求解得到的 C_L 和 C_D 的平均值的误差在1%左右,这一误差可以接受,以下求解气动力和流场的计算都是基于网格 $93\times93\times140$ 的.

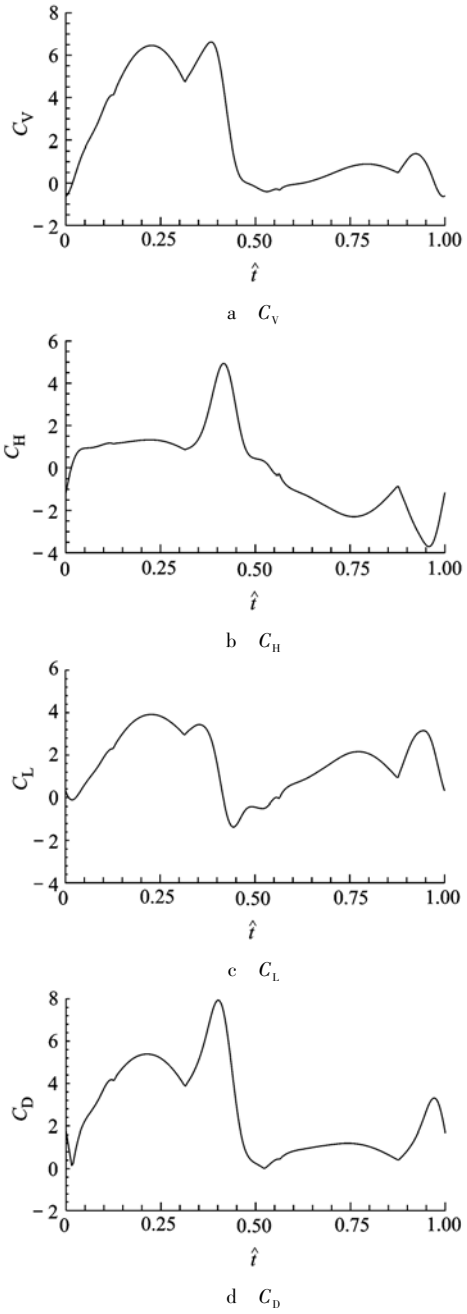
2.2 平均气动力及力的平衡

食蚜蝇悬停飞行时,翅膀的平均举力平衡体重,平均水平力应为0. 上文提到,实验观测未给出上下拍攻角 α_d 和 α_u,下文将用悬停飞行时的力平衡条件来确定 α_d 和 α_u. 昆虫的无量纲体重用 C_G 表示,$C_G = mg/0.5\rho U^2(2S) = 2.27$. 当取 $\alpha_d = 55°$, $\alpha_u = 22°$ 时,平均举力系数(一个拍动周期内的平均值) $\bar{C}_V = 2.21$,平均水平力系数 $\bar{C}_H = -0.06$,基本满足了悬停飞行时力的平衡条件. 应该指出,实验虽未给出具体的 α_d 和 α_u 的数值,但已表明,食蚜蝇在下拍过程中翅膀的弦向基本水平,上拍过程翅膀的弦向接近垂直,即 α_d 和 α_u 分别大致为45°和35°. 可见上述满足力的平衡条件的 α_d 和 α_u($\alpha_d = 55°$, $\alpha_u = 22°$)是较合理的. 因而,本文取 $\alpha_d = 55°$, $\alpha_u = 22°$.

2.3 气动力的产生机制

前面讨论了力的平衡及一个周期内的平均气动力系数,现在来考察一个拍动周期内气动力和流场随时间的变化情况,以分析食蚜蝇悬停飞行时气动力的产生机制.

图4给出了 C_V, C_H, C_L 以及 C_D 在一个周期内的变化曲线. 由图4a可以看到,大部分的举力(即平衡体重所需的力)来源于下拍阶段,上拍阶段产生的举力很少,这与正常悬停的昆虫上下拍阶段均产生举力有所不同,通过计算可知,91%的举力由下拍阶段产生. 如图4b所示,水平力系数在上下拍阶段大小基本相等,方向相反,从而平均水平力系数近似为0.



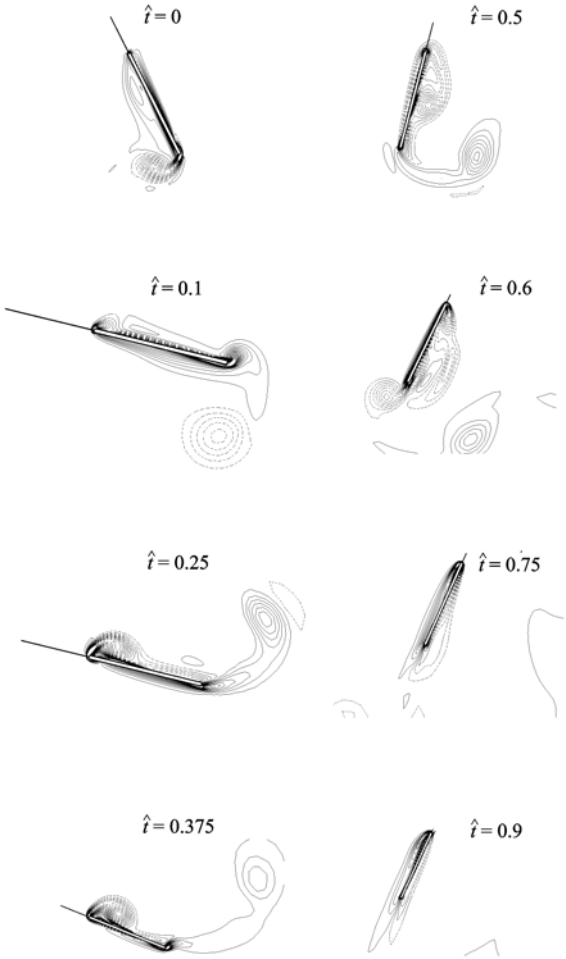
a C_V　b C_H　c C_L　d C_D

图4 一个拍动周期内的气动力系数

昆虫飞行时的举力和水平力主要是其翅膀的拍动过程中所产生的升力和阻力贡献的. 从图4c和图4d可以看出,下拍阶段 C_D 和 C_L 的大小相差不大;该昆虫的拍动平面倾角 β 接近45°. 这就意味着下拍阶段的举力是由升力和阻力共同贡献的. 这与水平拍动的情形不同,水平拍动时举力是由翅膀的升力贡献的. 由图4c和图4d,可以计算得到下拍过程中36%的举力来源于升力的贡献,64%的举力来源于阻力的贡献.

图5给出了模型翅在一个拍动周期内几个不同时刻 r_2 截面处的等涡量线. 在整个下拍过程中($\hat{t} = 0 \sim 0.5$)前缘涡都没有脱落,由此可以看出下拍过程中的升力和阻力,即平衡昆虫体重所需的

力,主要是由不失速机制产生的.



实线和虚线分别表示正涡量和负涡量;最外层的无量纲涡量绝对值为 1,等值线间隔为 3.

图 5　模型翅在一个拍动周期内不同时刻 r_2 截面处的等涡量线

2.4　功率与能耗

昆虫翅膀在拍动运动过程中所消耗的功率 P 的定义如下:

$$P = (\boldsymbol{M}_a + \boldsymbol{M}_i) \cdot \boldsymbol{\Omega}$$

其中,$\boldsymbol{M}_a$ 为绕翅膀根部的气动力矩,可由翅膀上气动力的分布计算得到;$\boldsymbol{M}_i$ 为绕翅膀根部的惯性力的力矩;$\boldsymbol{\Omega}$ 已知,为翅膀的角速度矢量. 对于 $\boldsymbol{M}_i$,按照文献[21]所述的方法来确定如下. 计算 $\boldsymbol{M}_i$ 需要知道翅膀的惯性矩,由于测量数据的限制无法给出绕翅膀展向轴的惯性矩,但是实际翅膀的质量分布主要集中在翅膀的展向轴附近,因此可以将这个惯性矩分量忽略,并且认为其他两个方向的惯性矩(I_{wg})相等. $I_{wg} = m_{wg} r_{2,m}^2$,其中 $r_{2,m}$ 为翅膀的回转半径,根据文献[12]的测量数据 $r_{2,m}/R = 0.4$,单个翅膀质量 $m_{wg} = 0.21$ mg,所以该食蚜蝇的 $I_{wg} = 0.405 \times 10^{-11}$ kg · m^2,而翅膀的加速度可以通过 $\boldsymbol{\Omega}$ 得到,由此就可以计算得到 $\boldsymbol{M}_i$.

图 6 给出了一个周期内由气动力矩产生的功率系数 $C_{P,a}$,由惯性力矩产生的功率系数 $C_{P,i}$,总功率系数 C_P($C_{P,a}$与 $C_{P,i}$之和)的变化曲线(功率系数是由 $0.5\rho U^2 Sc$ 对功率无量纲化后得到的). 对一个拍动周期内的 C_P 的正值和负值分别积分,可以得到拍动运动的正功系数 C_W^+ 和负功系数 C_W^-. 比功率 P^* 定义为一个拍动周期内的平均机械功与昆虫重量的比值,即

$$P^* = 9.81 \times UC_W/(\tau_c \times C_G)$$

其中 C_W 为一次拍动中的无量纲功. 当计算 C_W 时需要考虑怎样计入负功,有两种计算方法:

1) 负功以热量和声的形式完全消耗掉,在计算无量纲功时忽略负功,即 $C_W = C_W^+$,相应的比功率 $P_1^* = 31.71$ W · kg^{-1};

2) 假设运动中的负功以弹性能量的形式被储存起来,而在翅膀做正功的时候释放出来,即 $C_W = C_W^+ - |C_W^-|$,相应的比功率 $P_2^* = 27.02$ W · kg^{-1}.

按照以上两种方法计算得到的比功率与文献[22]得到的食蚜蝇水平拍动的比功率(水平拍动时的比功率分别为 $P_1^* = 39$ W · kg^{-1},$P_2^* = 27$ W · kg^{-1})接近,说明倾斜拍动并不会带来额外的能耗. 而身体呈水平状态,拍动平面倾斜更便于进行机动飞行. 上面对食蚜蝇能耗的研究表明,食蚜蝇采取这种方式进行悬停飞行,在保证其便于进行机动飞行的同时,又不会带来额外的能耗.

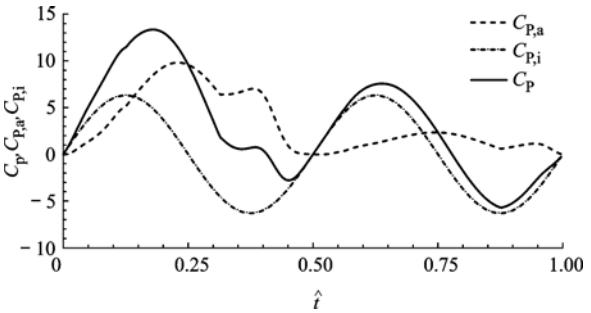


图 6　一个拍动周期内的功率系数

3　结　论

食蚜蝇在保持身体水平、拍动平面倾斜的状态进行悬停飞行时,维持其体重所需的举力主要由下拍产生,这与水平拍动情形(上下拍共同产生举力)不同;该举力是由翅膀的升力和阻力共同贡献的,这也与水平拍动情形不同(水平拍动时举力由翅膀的升力贡献);飞行的比功率约为 31.71 W · kg^{-1},与正常悬停时的接近,这表明这种悬停方式有便于进行机动飞行的优点,但不带来额外的能耗.

参考文献（References）

[1] Weis-Fogh T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanism for lift production[J]. Journal of Experimental Biology, 1973(59): 169 – 230

[2] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight III: kinematics[J]. Phil Trans R Soc Lond B, 1984, 305(1122): 41 – 78

[3] Norberg R A. Hovering flight of the dragonfly Aeschna juncea L, kinematics and aerodynamics. In swimming and flying in nature [M]. New York: Plenum Press, 1975: 763 – 781

[4] Ellington C P, van den Berg C, Willmott A P, et al. Leading-edge vortices in insect fight[J]. Nature, 1996, 384(6610): 626 – 630

[5] Taylor G K, Thomas A L R. Dynamic flight stability in the desert locust Schistocerca gregaria[J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(16): 2803 – 2829

[6] Wang Z J, Birch J M, Dickinson M H. Unsteady forces and flows in low Reynolds number hovering flight: two-dimensional computations vs robotic wing experiments[J]. Journal of Experimental Biology, 2004, 207(3): 449 – 460

[7] Bergou A J, Ristroph L, Guckenheimer J, et al. Fruit flies modulate passive wing pitching to generate in-flight turns[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(14): 3065 – 3083

[8] Zhang Y L, Sun M. Wing kinematics measurement and aerodynamics of free-flight maneuvers in drone-flies[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010, 26(3): 371 – 382

[9] Zhang Y L, Sun M. Dynamic flight stability of hovering model insects: theory versus simulation using equations of motion coupled with Navier-Stokes equations[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010, 26(4): 509 – 520

[10] Du G, Sun M. Effects of wing deformation on aerodynamic forces in hovering hoverflies[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(13): 2273 – 2283

[11] Meng X G, Xu L, Sun M. Aerodynamic effects of corrugation in flapping insect wings in hovering flight[J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(3): 432 – 444

[12] Ellington C P. The aerodynamics of hovering insect flight II: morphological parameters[J]. Phil Trans R Soc Lond B, 1984, 305(1122): 17 – 40

[13] Sun M, Tang J. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(1): 55 – 70

[14] Rogers S E, Kwak D. Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations[J]. AIAA Journal, 1990, 28: 253 – 262

[15] Rogers S E, Kwak D, Kiris C. Numerical solution of the incompressible Navier-Stokes equations for steady-state and time-dependent problems[J]. AIAA Journal, 1991, 29: 603 – 610

[16] Sun M, Yu X. Aerodynamic force generation in hovering flight in a tiny insect[J]. AIAA Journal, 2006, 44(7): 1532 – 1540

[17] Sun M, Wu J H. Aerodynamic force generation and power requirements in forward flight in a fruit fly with modeled wing motion[J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(17): 3065 – 3083

[18] Wu J H, Sun M. Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing [J]. Journal of Experimental Biology, 2004, 207(7): 1137 – 1150

[19] Usherwood J R, Ellington C P. The aerodynamics of revolving wings: model hawkmoth wings[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(11): 1547 – 1564

[20] Usherwood J R, Ellington C P. The aerodynamics of revolving wings: propeller force coefficients from mayfly to quail[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(11): 1565 – 1576

[21] Sun M, Tang J. Lift and power requirements of hovering flight in drosophila virilis[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(16): 2413 – 2427

[22] Sun M, Du G. Lift and power requirements of hovering insect flight[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 19(5): 458 – 469

（编　辑：李　晶）